Die Schallgeschwindigkeit in Argon und ihre Beeinflussung durch Röntgenstrahlen.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der hohen Philosophischen Fakultät der Königlichen Universität Marburg

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

vorgelegt von

Franz Strieder
Maschineningenieur
aus Hofheim a. Taunus.

Marburg a. d. L. 1915
Buchdruckerei Robert Noske, Borna-Leipzig.

Von der Philosophischen Fakultät als Dissertation angenommen
am 12. November 1914.

Berichterstatter: Prof. Dr. F. Richarz.

Meinen lieben Eltern
in Dankbarkeit gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556035_0084

Inhaltsangabe.

Seite

A. Allgemeiner Teil.

I. Veranlassung zu vorliegender Arbeit. Absolute Bestimmung von $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ für Argon im Anschluß an frühere Arbeiten im Institut. Besprechung der bisher vorliegenden Bestimmungen von $\varkappa$ für Argon 1

B. Spezieller Teil.

II. Zusammenhang zwischen $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ und der Schallgeschwindigkeit. Meßmethoden 6

III. Versuchsanordnungen 8
1. Die bei den früheren Arbeiten benutzten Apparaturen . . 8
2. Die Behn-Geigersche Methode im Zusammenhang mit dem gewählten Versuchsgas. Deren Vorzüge für beide Versuchszwecke 9

IV. Versuchsplan und konstruktive Einzelheiten 11
1. Plan der Versuche 11
a) Für die absolute Bestimmung 11
b) Für die Ionisationsversuche 11
2. Die Behnsche Röhre mit Stativ und Luftrohr für beide Zwecke 12
3. Thermoelement 16
4. Ionisationsapparatur 17
5. Argonreinigungsapparatur 18

V. Die endgültigen Versuche und Ergebnisse 23
1. Versuche 23
a) Absolute Bestimmung 24
b) Ionisationsversuche 24
2. Berechnung der Ergebnisse 25
a) Absolute Bestimmung 25
b) Ionisationsversuche 29

VI. Betrachtungen über das Ergebnis 29
a) Absolute Bestimmung 29
b) Das negative Ergebnis der Ionisationsversuche . . . 30

A. Allgemeiner Teil.

I. Veranlassung zu vorliegender Arbeit. Absolute Bestimmung von $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ für Argon im Anschluß an frühere Arbeiten im Institut. Besprechung der bisher vorliegenden Bestimmungen von $\varkappa$ für Argon.

Im hiesigen Physikalischen Institut sind mehrere Untersuchungen ausgeführt worden zu dem Zwecke, festzustellen, ob sich die Größe

$$\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$$

eines Gases unter der Einwirkung ionisierender Mittel ändern könne.[1]) Diese Arbeiten hatten sich auf zwei- und dreiatomige Gase erstreckt. Die an diese Untersuchungen anknüpfende Erörterung der Erklärungsmöglichkeiten von Herrn Professor F. Richarz[2]) verlangte nun auch die Untersuchung einatomiger ionisierter Gase. Aus später zu erörternden Gründen wurde beschlossen, die betreffenden Versuche mit Argon durchzuführen. Da mit Rücksicht auf das kostspielige Edelgas eine andere Untersuchungsmethode als bei den eingangs erwähnten Arbeiten benutzt werden sollte, die auch sonst als vollkommener angesehen werden mußte, so unternahm ich es auf Anregung von Herrn Prof. Richarz, außer der Untersuchung über die Einwirkung

[1]) E. Rohlf, Diss. Marburg 1909; K. H. Küster, Diss. Marburg 1911; W. Küpper, Diss. Marburg 1912; ders., Ann. d. Phys. 1914 Bd. 43 S. 905; R. Ludwig, Diss. Marburg 1913.

[2]) F. Richarz, Ber. d. Ges. z. Bef. d. ges. Naturwiss. Marburg, Sitzung v. 7. 5. 1913, Separatabdruck S. 4.

der Ionisation auf $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ auch eine direkte Bestimmung dieser Größe auszuführen.[1]) Der hauptsächliche Grund zu diesem Entschluß war jedoch der, daß für Argon nur sehr wenige $\varkappa$-Bestimmungen vorliegen. Die Entdecker des genannten Gases, Ramsay und Rayleigh, hatten für Argon, welches nach ihrer Angabe[2]) noch etwa 2—3 % Stickstoff enthielt, wohl $\varkappa$ zu 1,65 bestimmt, jedoch kann dieser Wert des unreinen Gases halber nicht als ein endgültiger angesehen werden, zumal er nur zu dem Zweck festgestellt wurde, die Einatomigkeit des neuentdeckten Gases zu erweisen. Diesen Wert mittels der von F. Richarz abgeleiteten Formel für $\varkappa$ eines Gasgemisches[3]) zu korrigieren, wurde nicht versucht, da die Angaben über die Verunreinigung des von Ramsay und Rayleigh untersuchten Gases dazu nicht ausreichen. Die einzige genaue Bestimmung mit reinem Argon wurde von O. Niemeyer[4]) ausgeführt und ergab den Wert $\varkappa = 1{,}667$, wobei gleichzeitig dessen Unabhängigkeit von der Temperatur zwischen 0° und 100° dargetan wurde. Da nun einerseits die genaue Bestimmung von $\varkappa$ von der größten Wichtigkeit für die Ermittlung der Abweichungen vom idealen Gaszustande ist, Niemeyer sich jedoch andererseits zur völligen Befreiung des von ihm hergestellten Rohargon von Stickstoff chemischer Methoden bediente, welche nach G. Gehlhoff[5]) eine völlige Beseitigung des Stickstoffs nicht ermöglichen, so sollte zur Reinigung des von mir zu untersuchenden Argon die Entladungsmethode von Gehlhoff benutzt werden, die spektral reines Gas liefert.[6]) Um ferner die Anzahl der Dichtungsstellen an der das Versuchsgas enthaltenden Apparatur möglichst zu

---

[1]) F. Strieder, Verh. d. Deutschen Phys. Ges. Bd. 16 Nr. 13 S. 615/16 (vorläufige Mitteilung).

[2]) Ramsay, Philos. Transact. 1895 Vol. 186 p. 186, Proc. Roy. Soc. Vol. 56 1896, Vol. 64 1899, Vol. 67 1900, Nature Vol. 63 1900 p. 165; Zeitschrift für phys. Chemie 1899 Bd. 28 S. 241.

[3]) F. Richarz, Ann. d. Phys. 1906 IV, 19 S. 639—642; A. Jakobs, Diss. Marburg 1904; J. Kapp, Diss. Marburg 1907.

[4]) O. Niemeyer, Diss. Halle 1902.

[5]) G. Gehlhoff, Verh. d. Deutschen Phys. Ges. 1911 Bd. 13 S. 271—277.

[6]) Ebenda.

beschränken, faßte ich die Anwendung der später näher zu beschreibenden Behn-Geigerschen Röhre ins Auge, die an sich wenigstens keine Dichtungen verlangt. Im folgenden sei nun zunächst einiges über die erwähnten Untersuchungen betreffend den Einfluß der Ionisatoren auf $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ mitgeteilt.

Das Verhältnis der spezifischen Wärme eines Gases bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen

$$\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$$

läßt sich nach der kinetischen Gastheorie ganz allgemein darstellen durch den Ausdruck

$$\varkappa = 1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{1 + \frac{U_r}{U_p}}, \tag{1}$$

wobei U_r die intramolekulare, also rotatorische und oszillatorische Bewegungsenergie der Atome, U_p dagegen die progressive Bewegungsenergie der ganzen Molekeln bedeuten soll. Nimmt man nun mit Boltzmann eine vollkommen starre Verbindung der Atome in der Molekel an, so findet man z. B. für zweiatomige Gase den Wert $\varkappa = 1{,}40$. Für einatomige Gase wird in der Formel (1) $U_r = 0$, also $\varkappa = 1{,}666$. Bestimmt man die $\varkappa$-Werte für verschiedene Gase experimentell, so findet man gegenüber den entsprechenden aus der Theorie folgenden Werten nur geringe Abweichungen. Diese Differenzen stehen im Zusammenhang mit den Annahmen über die Konstitution der Molekeln, jedoch soll auf die Erklärungsmöglichkeiten dieser Abweichungen hier nicht näher eingegangen werden. Viel wichtiger ist die Feststellung, daß die experimentelle Bestimmung des $\varkappa$-Wertes für ein und dasselbe reine und unveränderte Gas meist zu demselben Wert führt, so daß diese Konstante genau bekannt ist.[1])

Zu den Ausnahmen hiervon gehören Bestimmungen, welche im hiesigen Institut ausgeführt wurden. So fand E. Rohlf[2]) für reinen, elektrolytisch hergestellten Sauerstoff den Wert

[1]) z. B. Landolt-Börnstein, Tabellen, Berlin 1912, S. 775.

[2]) E. Rohlf, Diss. Marburg 1909.

$\varkappa = 1{,}450$. Dieser gegenüber dem normalen auffallend hohe Wert konnte weder durch systematische, noch durch Versuchsfehler erklärt werden. Immerhin mußte die Ursache dieser Erscheinung im Versuchsgase selbst gesucht werden, möglicherweise in einer Annäherung an den einatomigen Zustand, der ja eine Erhöhung von $\varkappa$ mit sich gebracht hätte. Um die vorliegenden Verhältnisse zu klären, unternahm Herr K. H. Küster[1]) an reinem, elektrolytisch bereitetem Sauerstoff eine Nachprüfung mit dem Ergebnis, daß sich neben dem mit der Theorie gut übereinstimmenden Wert $\varkappa = 1{,}402$ auch erhöhte Werte bis 1,430 fanden. Es stellte sich nun heraus, daß bei den Küsterschen Versuchen der erhöhte Wert dann eintrat, wenn das Versuchsgas längere Zeit mit dem als Trockenmittel benutzten Phosphorpentoxyd in Berührung gewesen war. Bei Rohlf kam in Betracht, daß elektrolytisch hergestellte Gase, wenigstens frisch bereitet, immer Ionen[2]) enthalten. Auch wurde nun festgestellt, daß Rohlf bei seinen Versuchen ebenfalls käufliches P_2O_5 als Trockenmittel benutzt hatte. Nach den Untersuchungen von Schenck und Mihr[3]) wirkt Phosphortrioxyd P_4O_6, wie es in käuflichem Phosphorpentoxyd meist spurenweise vorhanden ist, ebenfalls ionisierend. Daher sprach Herr Prof. Richarz die Vermutung aus, die Erhöhung der $\varkappa$-Werte bei Rohlf und Küster möge mit einer Ionisation des Versuchsgases im Zusammenhange stehen. Herr Prof. Richarz veranlaßte daher die Anwendung noch anderer Ionisationsmittel. Zunächst fand Küster, als er trockene Luft mit Röntgenstrahlen bis zur Dauer von 20 Minuten bestrahlte, eine Erhöhung des $\varkappa$-Wertes für Luft vom Normalwert $\varkappa = 1{,}4023$ bis auf $\varkappa = 1{,}4558$. Es schien somit festgestellt, daß sowohl Ionisation infolge chemischer bezw. elektrochemischer Prozesse, als auch Ionisation durch Röntgenstrahlen mit der Erhöhung des $\varkappa$-Wertes im Zusammenhange standen. Herr Prof. Richarz ließ nunmehr zunächst

---

[1]) K. H. Küster, Diss. Marburg 1911.

[2]) Rob. v. Helmholtz und F. Richarz in Wiedemanns Ann. 1890 Bd. 40 S. 161.

[3]) R. Schenck und Mihr, Ber. d. Deutschen Chem. Ges. 1906 (2) Bd. 39 S. 1506.

eine Untersuchung von zwei- bezw. dreiatomigen Gasen unter Benutzung von Röntgen-, ultravioletten, Becquerelstrahlen und des elektrischen Wechselfeldes als Ionisatoren durch Herrn W. Küpper ausführen. Küpper[1]) fand bei Röntgenbestrahlung von Luft, Sauerstoff und Stickstoff eine deutliche Erhöhung des Wertes $\varkappa$, bei Wasserstoff dagegen nur eine sehr geringe. Die mittels Quecksilberdampflampe erzeugten ultravioletten Strahlen ergaben bei Stickstoff und Wasserstoff einen erhöhten Wert, erzeugten dagegen in Luft und Sauerstoff dreiatomige Ozonmolekeln mit $\varkappa$ nahezu $= 1{,}30$, die den $\varkappa$-Wert der beiden genannten Gase erniedrigten. Die mittels Radiumbromid und mit dem elektrischen Wechselfeld angestellten Versuche verliefen ergebnislos. In der zweiten durch die Entstehungsgeschichte der $\varkappa$-Erhöhungen gegebenen Richtung unternahm Herr R. Ludwig[2]) die entsprechenden Versuche, indem er den Einfluß der Phosphorverbindungen bei Luft und Sauerstoff untersuchte. Herr Ludwig fand bei langsamer Oxydation von Phosphor durch mäßig erwärmte Luft $\varkappa$-Erhöhungen von 0,34 bis 0,87 %, bei Einwirkung reinen Phosphortrioxyds auf Luft entsprechend 0,57—0,79 % Erhöhung, während käufliches Phosphorpentoxyd ohne Einwirkung blieb. Die diesen entsprechenden Versuche mit Sauerstoff ergaben keine merkliche Änderung des $\varkappa$-Wertes. An diese Ergebnisse systematisch angestellter Untersuchungen schlossen sich theoretische Betrachtungen, welche an späterer Stelle erörtert werden sollen und welche Herrn Prof. Richarz bestimmten, nunmehr Ionisationsversuche an einatomigen Gasen ausführen zu lassen. Diese Versuche im Anschluß an eine absolute Bestimmung von $\varkappa$ für Argon durchzuführen, ist der Gegenstand vorliegender Arbeit.

---

[1]) W. Küpper, Diss. Marburg 1912, sowie Ann. d. Phys. 1914 Bd. 43 S. 905.

[2]) R. Ludwig, Diss. Marburg 1913.

B. Spezieller Teil.

II. Zusammenhang zwischen $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ und der Schallgeschwindigkeit. Meßmethoden.

Der Wert $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ kann naturgemäß gewonnen werden durch Messung von c_p und c_v allein. Indessen bietet die experimentelle Bestimmung von c_v beträchtliche Schwierigkeiten. Man kann aber auch $\varkappa$ direkt, unter anderem auf akustischem Wege bestimmen. Für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Schwingung in einem idealen Gase ergibt sich, wenn man den Vorgang als isothermisch verlaufend voraussetzt, die Beziehung

$$v = \sqrt{\frac{p}{\mu}},$$

wo v die Schallgeschwindigkeit, p den Druck und μ die Dichte bezeichnen sollen. Nimmt man nun mit Laplace[1]) an, die bei der Schallfortpflanzung entstehenden Verdichtungs- und Verdünnungsvorgänge im Gase verliefen adiabatisch, so wird aus obiger Beziehung

$$v = \sqrt{\frac{\varkappa \cdot p}{\mu}}. \tag{2}$$

Führt man statt $\frac{p}{\mu}$ noch $R \cdot \Theta$ ein, wo R die individuelle Gaskonstante, Θ die absolute Temperatur bezeichnen, so erhält man

$$v = \sqrt{\varkappa \cdot R \cdot \Theta}. \tag{3}$$

Die Schallgeschwindigkeit v ist nun nicht direkt meßbar, da man die zur direkten Messung nötigen umfangreichen Versuchsräume nicht gut verwirklichen bezw. auf konstanter Temperatur halten kann. Man bestimmt daher die Schallgeschwindigkeit im Versuchsgas durch Vergleich mit der anderweitig sicher be-

[1]) H. v. Helmholtz, Vorlesungen über die Theorie der Wärme, herausgeg. von F. Richarz, Bd. 6 § 48 S. 192.

stimmten Schallgeschwindigkeit in Luft. Bezeichnet man mit ν die Schwingungszahl, mit λ die Wellenlänge, so ist allgemein

$$v = \nu \cdot \lambda .$$

Für zwei Gase mit v_1, ν_1, λ_1 und v_2, ν_2, λ_2 ist dann

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \tag{4}$$

für denselben Ton mit der Schwingungszahl $\nu_1 \quad \nu_2$. Man erhält hieraus für die $\varkappa$-Werte zweier Gase die Beziehung

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\sqrt{\varkappa_1 R_1 \Theta_1}}{\sqrt{\varkappa_2 R_2 \Theta_2}} . \tag{5}$$

Führt man noch die Molekulargewichte M_1 und M_2 ein und läßt die Größen $\varkappa_1$, λ_1, M_1 für Luft, die Größen $\varkappa_2$, λ_2, M_2 für das Versuchsgas gelten, so findet man bei Temperaturgleichheit beider Gase

$$\varkappa_2 = \frac{\lambda_2^{\,2}}{\lambda_1^{\,2}} \frac{M_2}{M_1} \varkappa_1 . \tag{6}$$

Für ein und dasselbe Gas bei den Temperaturen Θ_1 und Θ_2 absolut ergibt sich

$$\varkappa_2 = \frac{\lambda_2^{\,2}}{\lambda_1^{\,2}} \frac{\Theta_1}{\Theta_2} \varkappa_1 . \tag{7}$$

Mittels dieser Beziehung kann man eine etwaige Temperaturänderung während der Jonisation von Θ_1 auf Θ_2 berücksichtigen. Bestimmt man mittels einer dieser Formeln $\varkappa$, so muß man immer bedenken, daß primär die Wellenlängen λ_1 und λ_2 gemessen werden, man es also mit einer Bestimmung der Schallgeschwindigkeit zu tun hat, während ein veränderter $\varkappa$-Wert sich erst sekundär rechnungsmäßig aus obigen Formeln ergibt, ein Umstand, auf den Herr Prof. Richarz[1]) stets ausdrücklich hingewiesen hat.

---

[1]) F. Richarz, Verh. d. Ges. zur Bef. d. gesamten Naturwissensch., Marburger Sitzungsbericht v. 7. 5. 1913.

III. Versuchsanordnungen.

1. Die bei den früheren Arbeiten benutzten Apparaturen.

Bei den Untersuchungen von Küster,[1]) Küpper[2]) und Ludwig[3]) wurde zur Messung bezw. Vergleichung der Schallgeschwindigkeit die Resonanzmethode von Quincke[4]) angewandt. Ein Glasrohr von passenden Dimensionen wurde am einen Ende mit einem kurzen Stutzen aus Messingrohr versehen, an welchem ein Telephon luftdicht befestigt war. Dieses Telephon wurde mittels eines Saitenunterbrechers, der intermittierenden Gleichstrom liefert, zum Tönen gebracht, wodurch die Luftsäule im Inneren des Rohres nach dem Tempo des Saitenunterbrechers in Schwingung geriet. Vom anderen Ende des Glasrohres her konnte durch eine dicht schließende Stopfbüchse hindurch ein Messingrohr axial in der Glasröhre verschoben werden, welches an seinem Ende im Inneren der Glasröhre ein Kohlenkörnermikrophon (Reichspostmodell) trug. Dieses Mikrophon war durch eine Induktionsspule mit einem Telephon zum Abhören verbunden. Wurde das gleichzeitig als schallreflektierende Wand dienende Mikrophon durch Axialverschiebung in eine solche Lage gebracht, daß sein Abstand von der schallerregenden Telephonmembran ein ganzes Vielfaches von der Halbwellenlänge des erregenden Tones wurde, so traten infolge der Resonanz stehende Schwingungen im Glasrohr ein. Die Maxima derselben waren dann am Abhörtelephon festzustellen und durch Verschieben des Mikrophons die Halbwellenlänge zu ermitteln. Um die Empfindlichkeit der Einstellung zu erhöhen, wurde nicht auf den Grundton, sondern auf die schärfer definierten harmonischen Obertöne eingestellt. Die ganze Anordnung war in doppelter Ausführung vorhanden mit Ausnahme des gemeinsamen Saitenunterbrechers und ermöglichte Schallgeschwindigkeitsvergleichungen zwischen Luft und anderen Gasen bezw. zwischen Luft oder anderen Gasen in normalem und ioni-

[1]) H. Küster, Diss. Marburg 1911.
[2]) W. Küpper, Diss. Marburg 1912.
[3]) R. Ludwig, Diss. Marburg 1913.
[4]) G. Quincke in Wiedemanns Ann. 1898 Bd. 63 S. 66.

siertem Zustande. Die Methode verlangt zur Füllung der Röhren ziemliche Gasmengen, da die normalen Mikrophone einen Rohrdurchmesser von ca. 60 mm bedingen. Zudem ist die erwähnte Stopfbüchse ein nicht ganz einwandfreier Bestandteil, da deren Dichtheit nicht zweifellos ist. Da für meine Untersuchung das kostspielige Argon verwendet werden sollte, war nach obigen Auseinandersetzungen die beschriebene Methode für meinen Zweck nicht geeignet. Auf Anraten von Herrn Prof. F. A. Schulze beschloß ich, die Staubfigurenmethode von Kundt in der Abänderung anzuwenden, die sie durch Behn und Geiger[1]) erfahren hatte. Diese Modifikation ist hervorgegangen aus der bekannten Anordnung von Kundt, bestehend aus einer einseitig geschlossenen Röhre, in deren anderes Ende ein in der Mitte seiner Länge eingeklemmter Stab aus irgendeinem Material hineinragt, der im Inneren des Rohres eine die Rohrwand nicht berührende Korkscheibe trägt. Bringt man in die Röhre feines Korkpulver und reibt den Stab longitudinal an, so überträgt er seine Schwingungen auf das Gas in der Röhre, und das Korkpulver ordnet sich in den bekannten Staubfiguren an, falls die Halbwellenlänge im Gas ein ganzes Vielfaches des erregenden Stabtones ist. Die dies bedingende Resonanz wird also durch Längenabstimmung herbeigeführt. Mit dieser Anordnung kann man die Schallgeschwindigkeiten in festen Körpern etwa mit der in Luft und diejenigen verschiedenen Gase untereinander vergleichen.

2. Die Behn-Geigersche Methode im Zusammenhang mit dem gewählten Versuchsgas. Deren Vorzüge für beide Versuchszwecke.

Kundt hatte für den letztgenannten Fall die Anordnung bereits dahin vereinfacht, daß er das Versuchsrohr an beiden Enden mit Korken verschloß, es in der Mitte passend einklemmte und an einem freien Ende anrieb. In diesem Falle entstanden, falls die mehrfach erwähnte Resonanz bestand, ebenfalls die

[1]) U. Behn und H. Geiger, Verh. d. Deutschen Physik. Gesellschaft 1907 Bd. 9 S. 657.

Staubfiguren, und zwar gibt die Anzahl der Halbwellenlängen direkt das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten im Glas und dem in der Röhre befindlichen Gase an. Schmilzt man das Rohr nach der Füllung mit dem Versuchsgas und der nötigen Menge Korkpulver an beiden Enden zu, so ist eine nachträgliche Verunreinigung des Gases durch Diffusion oder andere Ursachen unmöglich. Gleichzeitig ist aber auch die Längenabstimmung nicht mehr ausführbar. Behn und Geiger haben daher die beiden anderen Abstimmungsmöglichkeiten, nämlich Belastungsabstimmung und Temperaturabstimmung genauer untersucht. Die Belastungsabstimmung geschieht nach dem Vorgehen von Behn und Geiger durch Veränderung der Masse des longitudinal schwingenden Rohres durch Aufkitten von Metallscheibchen auf die Enden desselben. Die Schwingungszahl vermindert sich hierdurch, und man kann auf empirischem Wege Resonanz erhalten.

Die zweite Möglichkeit, die Temperaturabstimmung, beruht auf der Erwägung, daß bei Erwärmung des Behnschen Rohres die geringe Änderung des Elastizitätsmoduls und der Dichte des Glases keine bedeutende Änderung der Tonhöhe bewirken kann, dagegen die Schallgeschwindigkeit ziemlich stark mit der Temperatur variiert, für Luft z. B. etwa 0,6 m/sec für 1° C. Man kann also auch auf diesem Wege Resonanz erreichen. Behn und Geiger machten jedoch die Erfahrung, daß die Temperaturabstimmung unsicher und schwierig sei, schon wegen der Länge der Röhren. Da ich bei meinen Vorversuchen dieselbe Erfahrung machte, entschloß ich mich, die Behn-Geigersche „Einrohrmethode“ mit Belastungsabstimmung anzuwenden, zumal bei dieser Anordnung zwei schwingende Enden vorhanden sind gegenüber nur einem bei der ursprünglichen Kundtschen Röhre, ein Umstand, der die Intensität der Schwingungen bedeutend erhöht und für die Schärfe der Staubfiguren sehr günstig ist. Zudem erlaubte die Behnsche Methode mir die Anwendung weit engerer Röhren als bei der früher beschriebenen Mikrotelephonanordnung, was mit Rücksicht auf das teure Versuchsgas sehr erwünscht war. Gleichzeitig mußte bei Argon seiner hohen Dichte gegenüber dem von Behn und Geiger nach der Einrohrmethode untersuchten Helium ein besonders günstiges Resultat erwartet werden

im Hinblick auf die größeren ponderomotorisch-hydrodynamischen Kräfte,[1]) die der Dichte proportional sind.

IV. Versuchsplan und konstruktive Einzelheiten.

1. Plan der Versuche.

a) Für die absolute Bestimmung.

Für die praktische Ausführung der Versuche war folgender Gang in Aussicht genommen. Zur absoluten Bestimmung von $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ ist es notwendig, für denselben Ton die Halbwellenlänge in Argon und in Luft zu bestimmen. Zu diesem Zwecke sollte in derselben Achse vor einem Ende der Behnschen Röhre ein Glasrohr von etwa demselben Durchmesser in möglichst geringem achsialem Abstande angeordnet werden, dessen schwingende Länge durch einen verschiebbaren Kolben verändert werden konnte. Dieses „Luftrohr" sollte mit reiner, trockner, unveränderter Luft gefüllt und mit dem nötigen Korkpulver versehen werden. Tritt in diesem Rohr durch Regulierung der Luftsäulenlänge Resonanz ein, während das Behnsche Rohr angerieben wird, so hat man die Halbwellenlänge in Luft und in Argon für denselben Ton.

b) Für die Ionisationsversuche.

Da bei den Ionisationsversuchen mit einer Temperaturänderung im Versuchsgase zu rechnen war, so sollte die Röhre mit einem Thermoelement zur genauen Temperaturmessung versehen werden. Als Ionisator sollten lediglich Röntgenstrahlen Verwendung finden. Ultraviolettes Licht anzuwenden, war ausgeschlossen, da die Röhre in diesem Falle hätte aus Quarzglas bestehen müssen, welches im Gegensatz zu gewöhnlichem Glas ultraviolette Strahlen nicht absorbiert. Röhren, wie sie die Behnsche Methode verlangt, sind jedoch mit der erforderlichen Gleichmäßigkeit aus Quarz vorläufig nicht herstellbar. Nach dem Vorgange von W. Küpper[2]) aus einer Glasröhre ein Fenster

[1]) s. die Erklärung der Kundtschen Staubfiguren durch W. König in Wiedemanns Ann. 1891 Bd. 42 S. 549.

[2]) W. Küpper, Diss. Marburg 1912, S. 39.

auszuschneiden und mit einem entsprechend geformten Quarzglasstücke wieder zu verschließen, wurde aufgegeben, da die notwendige Kittung zwischen beiden Teilen den heftigen Longitudinalschwingungen nicht standgehalten hätte, abgesehen von anderen Bedenken. Vor allem wäre dieser Konstruktion eine große Bruchgefahr eigen gewesen, was mit Rücksicht auf das kostspielige Versuchsgas unbedingt vermieden werden mußte. Ein Radiumpräparat anzuwenden wurde ebenfalls aufgegeben, da dasselbe in das Argonrohr hätte eingeführt werden müssen, was bestimmt die Ausbildung der Staubfiguren sehr behindert hätte, abgesehen von der schwachen Wirkung des im Institut vorhandenen Präparates. Ebenso wurde auf die Anwendung des elektrischen Wechselfeldes der geringen zu erwartenden Wirkung halber verzichtet. In Aussicht genommen wurde also, eine Röntgenröhre für höchste Beanspruchung mit möglichst hoher Energie durch einen Funkeninduktor zu betreiben, die Röntgenröhre dem Argonrohr möglichst zu nähern und die Bestrahlungszeit möglichst lang zu nehmen. Die unvermeidliche Temperaturerhöhung sollte thermoelektrisch gemessen und nach der Formel (7) auf S. 7 in Rechnung gezogen werden. Die ohne Bestrahlung gemessenen Halbwellenlängen verglichen mit den nach Formel (7) korrigierten am Schlusse einer Bestrahlungsperiode erhaltenen sollten dann Aufschluß darüber geben, ob eine Änderung der Schallgeschwindigkeit eingetreten sei oder nicht. Im folgenden sollen zunächst die notwendigen Vorversuche und konstruktiven Maßnahmen besprochen werden.

2. Die Behnsche Röhre mit Stativ und Luftrohr für beide Zwecke.

Um die Bedingungen kennen zu lernen, unter denen die Behnsche Röhre am besten anspricht, und um gleichzeitig die nötige Übung in der Handhabung derselben zu erwerben, wurde eine Anzahl Vorversuche in verschiedenen Richtungen unternommen. Zunächst wurde ein Glasrohr von ca. 70 cm Länge und ca. 2,8 cm Innendurchmesser an den Enden gerade geschliffen und mit aufgekitteten Gewinderingen versehen, an welchen sich

Messingscheibchen als Belastungsgewichte festschrauben ließen. Wurde dieses Rohr mit einem etwas alkoholbefeuchteten Tuche angerieben, so zeigte sich bei Luft, noch mehr aber bei Füllung mit Kohlensäure, die bezüglich der Dichte dem Argon nahesteht, daß im allgemeinen keine starken Belastungen notwendig sind, um Resonanz zu erzeugen. Dagegen spielt die Wandstärke eine große Rolle, insofern sich dickwandige Rohre bedeutend schwerer zum Ansprechen bringen lassen als dünnwandige. Wandstärken von 0,8—1,0 mm sind bei Innendurchmessern von 23—25 mm und Rohrlängen von 60—90 cm noch hinreichend, um allzuleichtes Brechen der Röhren auszuschließen. Die bei größerer Wandstärke bezw. Durchmesserdifferenz im Glas bestehende innere Spannung macht das schwierigere Anreiben bei größeren Wandstärken erklärlich. Das Anreiben erfolgte nach der Vorschrift von Kundt kurz und möglichst parallel zur Rohrachse, was einige Übung erfordert. Da die Leichtigkeit des Anreibens ein Maß für die Vollkommenheit der Abstimmung ist, konnte ich die letztere bald genügend beurteilen. Weitere Versuche mit beiderseits zugeschmolzenen Glasröhren bestätigten diese Erfahrungen. Bei diesen Vorversuchen waren die Röhren in einem am Tisch festgeschraubten Bunsenstativ eingeklemmt. Hierbei wurde festgestellt, daß diese Einspannung nicht starr genug war. Es wurde daher zur Konstruktion einer zweckmäßigeren Einspannvorrichtung geschritten (s. Fig. 1 u. 2). Zunächst wurden zwei Eichenholzprismen A und B von 100 cm Länge und einem Querschnitt von 8×3 cm an den Enden mit 2 Eichenholzfüßen C und D mit Auflagerplatten derart verschraubt, daß die beiden Prismen einen gleichmäßigen Abstand von ca. 3 cm voneinander hatten. Hierbei wurde die 8 cm-Dimension der Prismen A und B senkrecht angeordnet, um das größte Widerstandsmoment gegen Durchbiegung zu erhalten. Zur Einspannung der Glasröhren wurde aus 2 Eichenholzstücken E und F mit je einer halbkreisförmigen Ausnehmung bei I und Spannschrauben G und H eine Klemme angefertigt; durch eingepaßte Futterringe I kann diese Klemmvorrichtung für verschiedene Rohrdurchmesser bis ca. 40 mm benutzt werden. Die Klemme wird durch einen Zugbolzen K mit Schraube auf den Prismen festgespannt und kann auf den Prismen beliebig

Fig 1

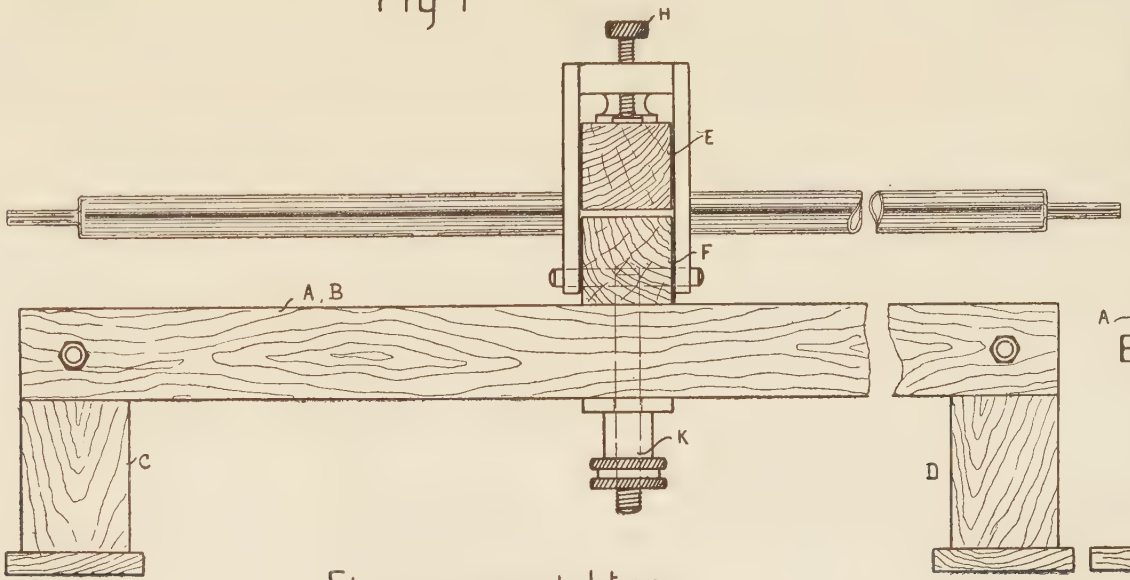
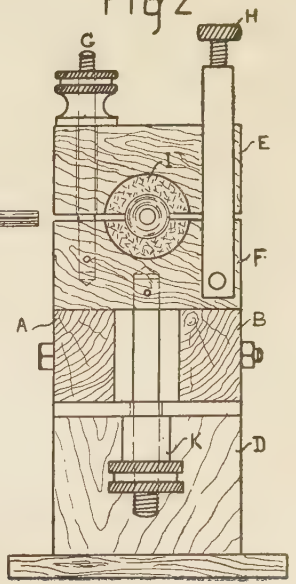


Fig 2



Einspannvorrichtung.

verschoben und gedreht werden. Dabei befindet sich die Rohrachse nur etwa 5 cm über der Oberkante der Prismen; große Hebelarme sind demnach vermieden, was für die Stabilität der ganzen Anordnung beim Anreiben sehr günstig ist.

Die nun folgenden Versuche sollten zunächst Klarheit darüber schaffen, ob die Länge der Einspannung in achsialer Richtung von Einfluß auf die Leichtigkeit des Ansprechens sei. Es wurden zunächst federnde Einspannringe aus Messing von nur 1 mm Breite angefertigt und unter Zwischenlage eines dünnen Kartonstreifens das Rohr damit eingeklemmt. Dann wurden Röhren in passend durchbohrten Korken von zunehmenden Längen bis etwa 40 mm eingespannt und dabei festgestellt, daß die Breite der Einspannungsstelle ohne merkbaren Einfluß auf das Ansprechen der Behnschen Röhre ist. Die Longitudinalschwingung im Glase setzt sich auch durch relativ breite Einspannstellen ungehindert fort. Eine Bremswirkung war in keinem Falle bei zahlreichen Versuchen festzustellen. Naturgemäß sind breitere Einspannfutter vorzuziehen, da das Rohr dabei leichter seine parallele Lage zu den Prismen beibehält und man zum genügend festen Einspannen die Klemme nicht übermäßig anspannen muß. Der Druck auf die Flächeneinheit und damit die Bruchgefahr sind dann gering. Es war in Aussicht genommen, das Rohr in der Mitte der Einspannstelle mit einem seitlichen Stutzen aus einem dünneren Glasrohr zu versehen, welcher sowohl zum Evakuieren als auch zum Einlassen des Argon dienen sollte. Ebenso wurde versucht in der Mitte der Hauptbestrahlungszone durch die Röntgenröhre einen kleinen seitlichen Stutzen an der Behnschen Röhre anzubringen, der die schon erwähnte Thermosäule aufnehmen sollte, damit die von Behn und Geiger als wichtig bezeichnete halbkugelige Zuschmelzung der Rohrenden ausführbar bliebe. Die Versuche mit derartigen Röhren zeigten jedoch an den Ansatzstellen der Stutzen stets eine Degeneration der Staubfiguren, so daß beschlossen wurde, das Gaszuführungsrohr sowie dasjenige zur Aufnahme der Thermosäule zentrisch in der Richtung der Rohrachse anzuordnen. Ich ließ mir vom Glasbläser Versuchsrohre anfertigen, die an den Enden achsial in der Mitte Glasröhrchen von etwa 8 mm Außendurchmesser bei

etwa 1 mm Wandstärke trugen, wobei ich vorschrieb, den hierbei entstehenden ringförmigen Boden möglichst eben herzustellen. Vorversuche zeigten, daß diese Röhren beim Zukitten der Ansatzröhren völlig einwandsfrei funktionierten. In das eine Ansatzröhrchen wurde die sogleich zu beschreibende Thermosäule eingekittet, während das andere nach Füllung der Röhre mit Argon mit einem dünnen runden Kartenblattscheibchen von 22 mm Durchmesser versehen wurde, welches genau zentrisch senkrecht zur Achse befestigt war. Weiter wurde eine etwa 40 cm lange fehlerfreie Glasröhre von etwa 23 mm Innendurchmesser genau in die Verlängerung der Achse des Behnschen Rohres gebracht und in dieser Lage in einem Bunsenstativ festgehalten; das Kartenblattscheibchen befand sich hierbei etwa $^1/_2$ mm vor dem Rohrende. In das andere Ende dieses Luftrohres wurde ein auf einem Glasstab sitzender, mäßig leicht verschiebbarer Kork als reflektierende Wand eingeführt, der vorn ebenfalls ein Kartenblattscheibchen trug, um eine glatte Oberfläche zu erzielen.

3. Thermoelement.

Das Thermoelement wurde in der Weise hergestellt, daß durch eine dünnwandige Glaskapillare von 2—3 mm Außendurchmesser und 20 cm Länge ein Feinsilberdraht von 0,1 mm Stärke und etwa 3 m Länge gezogen wurde. Um die Kapillare wurde ein Konstantandraht von denselben Dimensionen mehrmals herumgewunden, um ihm Halt zu geben, und dann beide Drähte am einen Ende der Kapillare durch Weichlötung zu der messenden Lötstelle vereinigt. Die der Lötstelle benachbarten 2 cm der Kapillare wurden zur Abdichtung mit Marineleim[1]) (Schellack, Kautschuk, Teeröl, Zinkoxyd als Füllmaterial) ausgefüllt. Die beiden Drähte wurden nun von dem andern Ende der Kapillare an durch übergezogene Baumwollgewebeschläuche voneinander isoliert und an den freien Enden weich mit Messingdrähten verlötet. Diese Lötstellen befanden sich bei der Messung in Reagenzgläsern, die in einem größeren Glase mit schmelzendem Eise standen. Zur Messung diente ein Drehspulengalvanometer von Siemens

[1]) Bezogen von C. A. Kahlbaum, Berlin.

& Halske von 70 Ohm System- und 1000 Ohm Vorschaltwiderstand. Es wurde unter Vorschaltung von noch 2000 Ohm auf passende Empfindlichkeit gebracht und mit Fernrohr und Skala abgelesen. Da das Instrument und der separate Vorschaltwiderstand Messingklemmen besaßen, waren die Verbindungen beider untereinander und mit dem Thermoelement mittels Messingdraht von demselben Stück ausgeführt, um die Kontaktpotentiale wenigstens nach Möglichkeit zu verringern. Die Eichkurve des Thermoelements war fast genau eine Gerade. Dieses Element wurde in den einen zentralen Stutzen des Behnschen Rohres etwa 12 cm weit eingeführt, das Rohr in derselben Weise, wie für die späteren definitiven Versuche in Aussicht genommen, bestrahlt und nun unter Verschiebung des Thermoelements festgestellt, daß für einen axial gemessenen Bereich von etwa 12 cm die Gastemperatur konstant war. Hierauf wurde das Thermoelement im Stutzen endgültig mit Marineleim festgekittet. Das ganze Thermoelement war absichtlich mit möglichst geringer Masse bezw. Wärmekapazität konstruiert, um eine schnelle Einstellung zu erreichen. Zudem führt ein Thermoelement von großer Wärmekapazität immer eine beträchtliche Wärmemenge von der Lötstelle ab, was bei den geringen hier in Frage kommenden Wärmemengen sehr unvorteilhaft gewesen wäre.

4. Ionisationsapparatur.

Da bei dem einatomigen Versuchsgase von vornherein mit einer jedenfalls nicht bedeutenden Änderung der Halbwellenlänge zu rechnen war, so mußte alles getan werden, um die ionisierende Wirkung möglichst zu steigern. War schon die Wandstärke des Versuchsrohres mit Rücksicht auf die Absorption der Röntgenstrahlen so dünn gewählt worden, als es die Festigkeitsverhältnisse erlaubten, so mußte nun noch eine möglichst leistungsfähige Röntgenröhre und eine beträchtliche Betriebsenergie für dieselbe zur Anwendung kommen. Zugleich sollte für möglichst geringen Abstand der Röntgenröhre vom Versuchsrohr und für möglichst günstige Strahlenrichtung gesorgt werden. Benutzt wurde eine Intensivstromröhre von E. Gundelach, Gehlberg i. Thür. Die-

selbe besaß eine Kupferantikathode mit hart aufgelötetem Platinspiegel und trug am äußeren Ende der Antikathode einen Radiator zur Abführung der Wärme. Die Röhre konnte nach Angabe der Verfertiger mit etwa 45—50 cm Funkenlänge bis 30 Minuten betrieben werden. Sie entsprach im übrigen den von W. Küpper[1]) benutzten Röhren. Zum Betrieb der Röhre stellte mir die Firma Siemens & Halske, Berlin-Nonnendamm einen modernen Funkeninduktor von 60 cm Schlagweite zur Verfügung, wofür der genannten Firma der gebührende Dank abgestattet sei. Der Induktor ließ drei verschiedene Schaltungen der Primärspule zu und konnte mit 5 KW maximal belastet werden. Zum Betrieb stand mir nur ein Wehneltunterbrecher zur Verfügung; ein entsprechender Quecksilberturbinenunterbrecher wäre vorzuziehen gewesen, war aber nur für 6 Amp. Belastung vorhanden. Auch mußte ich mich mit der Spannung von 65 Volt der Institutsbatterie begnügen, d. h. gerade der niedrigsten Spannung, bei der ein Wehneltunterbrecher für Starkstrom noch einigermaßen regelmäßig arbeitet. Es gelang mir aber durch entsprechende Einregulierung des Unterbrechers eine Stromstärke von 18—23 Amp. durch die Primärspule zu schicken, also etwa 1,3 KW. Es stand mir auch Gleichstrom von 110 Volt zur Verfügung, aber nur bis 10 Amp., also 1,1 KW. Ich zog daher den Betrieb mit 65 Volt vor, zumal der Wehneltunterbrecher gut arbeitete. Die Primärspule wurde mit einer Wicklung von geringer Windungszahl von geringem Widerstande benutzt, was bekanntlich für den Betrieb mit Wehneltunterbrecher Bedingung ist. Es ließen sich so Funken von 48 cm erreichen, also gerade für die Röntgenröhre passend. Für die Primärenergie von 1,3 KW betrug die sekundäre Stromstärke zwischen 3 und 4 Milliampère, wobei etwa 200000 Volt Sekundärspannung und ein Nutzeffekt des Induktors $\eta = 0{,}6$ angenommen ist.

5. Argonreinigungsapparatur.

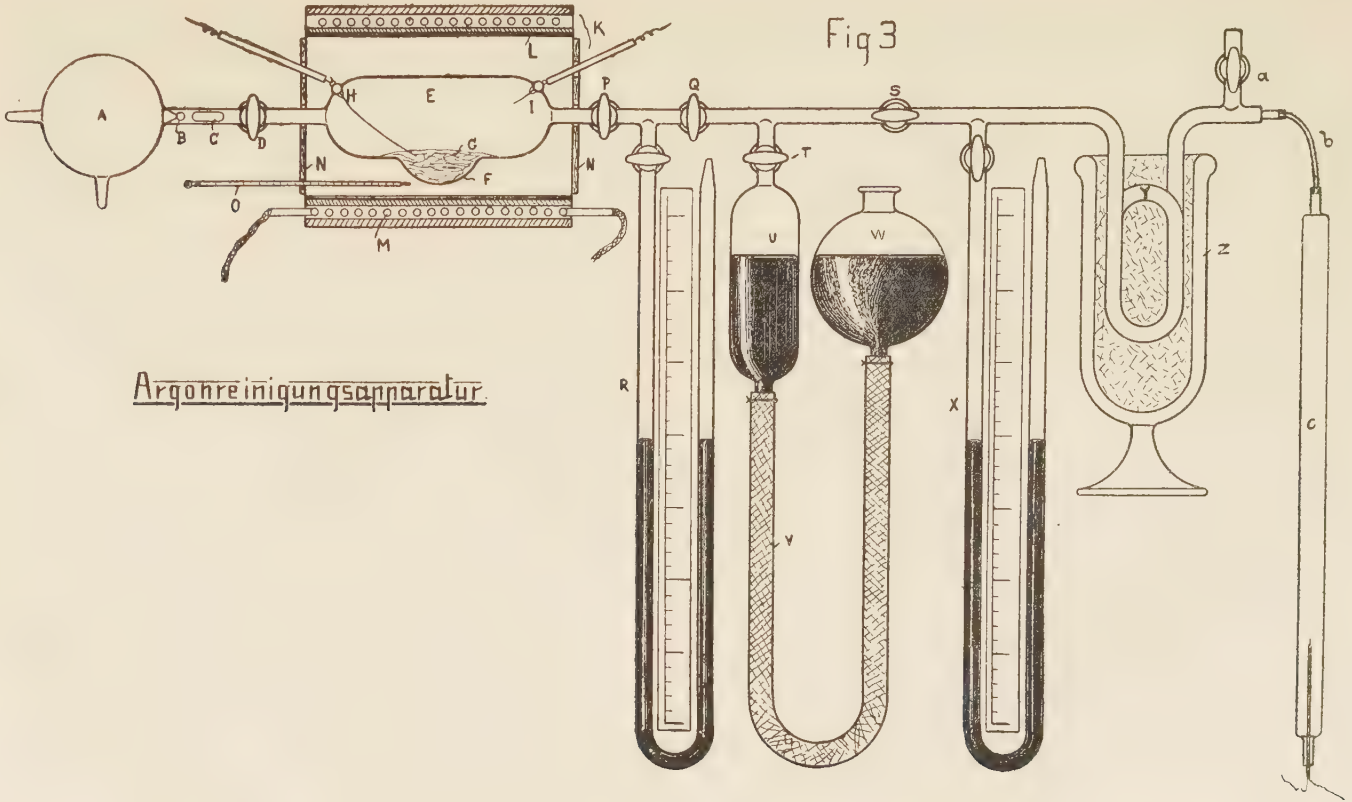
Ursprünglich beabsichtigte ich das Argon im Institut selbst darzustellen. Nachdem trockene kohlensäurefreie Luft durch glühende Kupferspäne ihres Sauerstoffs beraubt und dann der

[1]) W. Küpper, Diss. Marburg 1912 S. 38.

hierdurch entstandene „Luftstickstoff“ durch Überleiten über glühendes Magnesium in Rohargon übergeführt worden, sollte dieses durch Kalzium bezw. Lithium von den letzten Spuren von Stickstoff gereinigt werden. Von der Ausführung dieses Vorhabens wurde abgesehen mit Rücksicht darauf, daß diese Herstellungsart des Argon den gleichzeitigen Betrieb von vier Röhrenöfen, darunter zwei größeren, erfordert hätte, wozu mir in meinem Arbeitsraum eine Gasleitung von genügendem Querschnitt nicht zur Verfügung stand. Es wurde daher Rohargon aus dem chemischen Laboratorium der Herren Dr. Thiele und Dr. Froboese[1]) bezogen und mittels der von Dr. G. Gehlhoff[2]) angegebenen Methode gereinigt. Hierbei wird das zu reinigende Gas in eine „Kaliumzelle“ eingeleitet, ein Glasgefäß von etwa 6 cm Durchmesser bei 10 cm Länge, welches etwa 10 cm^3 reines Kalium enthält. Bringt man das Kalium auf eine Temperatur von etwa 200° und läßt durch die Zelle eine Hochspannungsentladung von 15—20 cm gehen, wobei das Kaliummetall Kathode ist, so absorbiert das Kalium die als Verunreinigungen vorhandenen Gase unter Bildung von Nitrüren, Hydrüren usw., während die Edelgase nicht absorbiert werden. Die Nitrüre, Hydrüre usw. besitzen bei der Betriebstemperatur der Kaliumzelle so niedrige Dampfdrucke, daß ihre Dämpfe nicht als Verunreinigung auftreten. Die Rohgase werden bei entsprechend kräftiger Entladung in wenigen Sekunden spektral rein. Die Reinigungs- und Überfüllapparatur war folgendermaßen konstruiert (s. Fig. 3): Das Rohargon war in einem Rezipienten A geliefert, der bei B ein Ansatzrohr mit Hahn D trug. An der Ansatzstelle war das Rohr durch eine dünnwandige Glasmembran vom Innern des Rezipienten getrennt. Das Rohr konnte bis zum Hahn D evakuiert werden, der alsdann geschlossen wurde. Erst unmittelbar vor der Überfüllung wurde durch Auffallenlassen eines zwischen Hahn und Membran befindlichen Glasstäbchens C die Membran zertrümmert und dem Rohargon der Weg bis zum Hahn D freigegeben. Diese sehr zweckmäßige Einrichtung ermöglicht die

[1]) Dr. Thiele & Dr. Froboese, Berlin, Prenzlauer Chaussee Nr. 1.
[2]) Dr. G. Gehlhoff, Verh. d. D. Phys. Ges. 1911 Bd. 13 S. 271—277.

Fig 3



Argonreinigungsapparatur

Aufbewahrung des Gases ohne ein Abschlußorgan, welches undicht werden könnte. Der Rezipient war mit der Kaliumzelle E verbunden (in der Figur sind eine Anzahl zum Verständnis unnötige Hähne und Schliffe weggelassen), die in einer bauchigen Erweiterung F das Kalium G enthält; von H führt ein Platindraht zum Kalium, I ist die andere Elektrode. Die Zelle war in den elektrischen Ofen K eingebaut; dieser bestand aus einem 10 cm weiten Kupferrohr L von 30 cm Länge bei 1 mm Wandstärke, auf welches, mit Asbest isoliert, etwa 25 m Nickeldraht M von 1 mm Durchmesser als Heizspirale aufgewickelt waren. Der Ofen war außen mit einer Wärmeisolierung versehen, in ein Eisengestell eingebaut und vorn und hinten mit Glimmerfenstern N,N ausgestattet, welche Öffnungen zur Einführung der in dickwandigen Glaskapillaren verlegten Hochspannungszuleitungen und eines Thermometers O hatten. Von der Kaliumzelle geht ein Glasrohr nach Hahn P, von da nach Hahn Q; zwischen beiden ist seitlich das Quecksilbermanometer R angeschlossen. Vom Hahn Q führt die Leitung nach Hahn S, zwischen Q und S zweigt ein Seitenstutzen mit Hahn T ab, an den sich ein Quecksilbergefäß U anschließt, welches durch den Schlauch V mit dem Quecksilberhubgefäß W in Verbindung steht. Die Teile Q, S, T, U, V, W bilden eine Geißlersche Quecksilberluftpumpe, deren Dreiweghahn durch die drei Einzelhähne Q, T, S ersetzt ist. Die Leitung trägt weiter seitlich das Manometer X, durchläuft in mehreren Windungen Y das Weinhold-Dewarsche Gefäß Z, trägt bei a einen Hahn zum Anschluß der Luftpumpe und führt endlich durch das Bleiröhrchen b zur Behnschen Röhre c. Letztere von der Leitung abzuschmelzen, mochte ich bei der Kostspieligkeit des Argon nicht wagen. Nach mehreren vergeblichen Vorversuchen wurde ein Bleiröhrchen von 3 mm Außen- und 1,5 mm Innendurchmesser in die Leitung und in den einen Endansatz der Behnschen Röhre mit Marineleim festgekittet. Dieses Röhrchen wurde nach Füllung der Röhre mit einer Flachzange flachgedrückt, durchschnitten und sofort noch auf der Schnittfläche verlötet. Dieses Verfahren bringt keine Bruchgefahr mit sich und bewährt sich bestens. Die Reinigung und Überfüllung verlief nun folgendermaßen: Die ganze Glasapparatur wurde

Teil für Teil mit Chromsäure, heißer Salpetersäure, destilliertem Wasser gereinigt. Die Wasserreste wurden mit absolutem Alkohol entfernt, die Apparatur zusammengesetzt, die Quecksilberpumpe mit reinem trockenen Quècksilber versehen und dann die ganze Apparatur unter Erwärmen evakuiert. Nach mehrmaligem Evakuieren (mittels einer Geryk-Ölluftpumpe), wobei auch völlige Dichtheit festgestellt wurde, konnte der elektrische Ofen angeheizt werden. Es waren hierbei außer D noch die Hähne P,T und a geschlossen, die übrigen offen. Nachdem das Thermometer O die Temperatur von 200° im Ofen angegeben, wurde die Kaliumzelle mit H als Kathode an einen Funkeninduktor von etwa 20 cm Schlagweite angeschlossen und dann durch vorsichtiges Öffnen von Hahn D eine kleine Menge Rohargon in die Kaliumzelle gebracht und D sofort wieder geschlossen. Es erfolgte alsbald der die vollendete Reinigung anzeigende Farbenumschlag an der Anode I von violettrot in gelbweiß.[1]) Nun ließ ich durch Öffnen von P das gereinigte Gas in die übrige Apparatur expandieren. Dies Verfahren wurde so lange fortgesetzt, bis die beiden Manometer R und X ihren Stand nicht mehr änderten, also in der ganzen Apparatur derselbe Druck herrschte. Um nun das noch im Rezipienten A befindliche Gas in die Apparatur überzuführen, mußte die Überfüllvorrichtung U, V, W zur Hilfe genommen werden. Um das Gas aus A nach E zu bringen, mußte in E ein Unterdruck hergestellt werden; es wurden zu diesem Zwecke D, P, Q, T geöffnet, S vorher geschlossen, dann durch Höhenregulierung von W nach E Gas angesaugt, bis das Quecksilber in U bis kurz über der Schlauchansatzstelle stand; dann wurde gereinigt, Q geschlossen, S geöffnet und durch Heben von W das Gas aus E und U nach der rechten Seite der Apparatur verdrängt. Hierbei konnte das Fortschreiten der Überfüllung an M_1 und M_2 verfolgt werden. Dieses Verfahren wurde so lange fortgesetzt, bis in c ein Druck von etwa 0,8 Atmosphären herrschte. Ein höherer Druck ließ sich mit Rücksicht auf die Volumverhältnisse der gesamten Apparatur nicht erzielen. Eine geringe Druckerhöhung machte

[1]) G. Gehlhoff, Verh. d. D. Phys. Ges. 1911 Bd. 13 S. 271–277.

gegen Ende der Überfüllung schon so zahlreiche Huboperationen notwendig, daß bei 0,8 Atmosphären aufgehört wurde, um nicht durch die Quecksilberbewegung Luftspuren mit einzuführen. Die Spirale Y wurde während der ganzen Dauer der Überfüllung durch Ätherkohlensäureschnee auf —79° gehalten, um etwaige Spuren von Feuchtigkeit, Fettdämpfen usw. zu kondensieren. Die Leitung enthielt vor der Spirale auch etwas Blattgold zur Beseitigung von Quecksilberdämpfen.

Alsdann wurde die Behnsche Röhre nach dem früher beschriebenen Verfahren von der Apparatur getrennt. Die spektroskopische Untersuchung des Gases ließ keine Linien anderer Gase erkennen. Sie wurde mittels eines Spektrographen ausgeführt, der die Vergleichung des Spektrums des vorliegenden Gases mit einem Argonspektrum erlaubte.

In die Behnsche Röhre war zur späteren Erzeugung der Staubfiguren vor der Füllung eine kleine Menge sehr feinen Korkpulvers gebracht worden, welches etwa 20 Tage im Vakuumexsikkator getrocknet worden war. Kieselsäurepulver wurde nicht verwandt, weil es die Glaswände rauh macht, was die Schallgeschwindigkeit erniedrigen kann.[1])

Lykopodium adhäriert infolge seiner Feinheit auch an ganz trockenen Glaswänden. Das etwas gröbere Korkpulver adhäriert weniger leicht, scheint auch weniger hygroskopisch als Lykopodium und ist deshalb namentlich zur Füllung des Luftrohres geeigneter. Es wurde daher sowohl im Argon- wie im Luftrohr Korkpulver benutzt.

V. Die endgültigen Versuche und Ergebnisse.

1. Versuche.

Nachdem die Behnsche Röhre endgültig für die Versuche vorbereitet war, wurde das vorher beschriebene Stativ auf dem Experimentiertisch festgeschraubt, die Röhre in die Klemme eingespannt und abgestimmt. Es zeigte sich hierbei, daß die Röhre der Abstimmung sehr nahe war, so daß einige kleine, an den

[1]) J. Müller, Ann. d. Phys. 1903 Bd. 11 S. 231.

Enden aufgekittete Metallstückchen zur Herstellung der Abstimmung ausreichten.

a) Die absolute Bestimmung von $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$.

Bei dieser Aufgabe handelte es sich darum, das früher beschriebene Luftrohr mit reiner, trockener Luft zu füllen. Es wurde mittels einer Wasserstrahlpumpe ein langsamer Luftstrom durch Kalilauge, zwei Chlorkalziumgefäße und daran anschließend durch das Luftrohr während mehrerer Stunden hindurchgesaugt, wobei das Luftrohr bereits mit Korkpulver versehen war. Alsdann wurde das Rohr schnell, um das Eindringen von ungetrockneter Zimmerluft zu vermeiden, mit dem Abstimmungsstempel verschlossen und mit dem anderen Ende dicht an das Kartenblattscheibchen am einen Ende des Behnschen Rohres gebracht. Es wurde nun, um Temperaturgleichheit in Argon- und Luftrohr eintreten zu lassen, längere Zeit gewartet, währenddessen das Luftrohr genau ausgerichtet, die Temperatur kontrolliert und das Behnsche Rohr einmal kurz angerieben. Es wurden im Argon- wie im Luftrohr je vier aufeinanderfolgende Halbwellenlängen mittels eines Glasspiegelmaßstabes parallaxenfrei gemessen. Der Maßstab war auf zwei Korkstücken befestigt und wurde, um Temperaturänderung zu vermeiden, nur an diesen Korkstücken angefaßt, wenn er von einem Rohr zum anderen gebracht wurde. Da hierdurch eine Längenänderung des Maßstabes vermieden war und an beiden Meßstellen die Temperatur überdies dauernd gleich war, wurde von einer Temperaturkorrektion abgesehen, um so mehr, als es sich um relative Messungen handelte. Jede Einzelablesung wurde dreimal wiederholt und aus den erhaltenen Werten das Mittel genommen.

b) Ionisationsversuche.

Die Verbindung zwischen Thermosäule und Galvanometer war auch während der Füllung der Argonröhre unverändert gelassen worden. Nunmehr wurde die Röntgenröhre an Seidenbändern derart über dem Versuchsrohr aufgehängt, daß die beiden rechts und links von der Thermolötstelle befindlichen Halbwellen-

längen von je etwa 46 mm Länge (aus Vorversuchen bekannt) möglichst senkrecht von der vom Antikathodenspiegel ausgehenden Strahlung getroffen wurden. Der Abstand der Antikathode von der Rohrwand betrug 11 cm. Die Röntgenröhre mußte ohne Schutzkasten frei aufgehängt werden, da noch während der Bestrahlung angerieben werden sollte, um bezüglich des Bestehens der Ionisation ganz sicher zu gehen, nachher aber zwecks Ausmessung der Staubfiguren die Röntgenröhre entfernt werden mußte. Während der etwa 30 Minuten dauernden Bestrahlungen verließ ich, um keine Schädigungen zu erfahren, das Arbeitszimmer. Es wurde zu Beginn jedes Versuches einmal ohne Bestrahlung kurz angerieben und aus 3—4 Ablesungen das Mittel der Halbwellenlängen bestimmt. Gleichzeitig wurde die Temperatur bestimmt. Dann wurde das Korkpulver wieder gleichmäßig verteilt, hierauf die Röntgenröhre in Betrieb gesetzt, die inzwischen stationär gewordene erhöhte Temperatur abgelesen, das Rohr angerieben und unmittelbar darauf der Induktor ausgeschaltet. Wegen der Temperaturerhöhung war eine Korrektur der Abstimmung durch ein kleines Metallstückchen nötig. Nach Entfernung der Röntgenröhre konnten die beiden in der Bestrahlungszone liegenden Halbwellenlängen, für die nach den Vorversuchen die Temperatur konstant war, gewessen werden. Nach jedem Versuch mußte zur Abkühlung der Röntgenröhre eine Pause von etwa 20 Minuten eintreten. Es wurden sechs Versuche angestellt, beim siebenten schmolz der Platinspiegel der Antikathode durch.

2. Berechnung der Ergebnisse.

a) Absolute Bestimmung.

Aus den Halbwellenlängen der Tabelle 1 ergeben sich aus der Formel

$$\varkappa = \frac{\nu^2_{\text{Luft}} \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \frac{\lambda^2_{\text{Argon}}}{\lambda^2_{\text{Luft}}}}{R_{\text{Argon}} \cdot \Theta}$$

bei der Versuchstemperatur von 18,3° C die einzelnen Werte von $\varkappa$. Deren Mittelwert ist

$$\varkappa = 1{,}6685 \pm 0{,}00021,$$

wobei das Korrektionsglied den wahrscheinlichen Fehler des Mittelwerts angibt.

Tabelle 1.

Nr.	$4 \cdot \lambda_{\text{Luft}}$	$4 \cdot \lambda_{\text{Argon}}$	$\varkappa$
1	19,90	18,43	1,667 89
2	19,99	18,52	1,666 89
3	19,94	18,47	1,668 32
4	19,98	18,51	1,668 85
5	19,92	18,45	1,668 05
6	19,97	18,51	1,670 53
7	19,97	18,50	1,668 72
8	19,90	18,43	1,667 79
9	19,92	18,44	1,666 25
10	19,93	18,46	1,668 29
11	19,96	18,49	1,668 59
12	19,95	18,48	1,668 45
13	19,97	18,51	1,670 52
14	19,93	18,47	1,669 99
15	19,92	18,45	1,668 05
Mittel:			1,668 5

Bezüglich der Konstanten C_1 in der vorstehenden Formel sei daran erinnert, daß im Argonrohr nur ein Druck von 0,8 Atm., im Luftrohr ein solcher von 1,0 Atm. bestand. Für idealen Gaszustand würde dies wegen $p \cdot v = R \cdot \Theta = \text{const.}$ keinen Einfluß haben. Die Abweichung vom idealen Gaszustand erfordert sowohl wegen dieses Druckunterschiedes als auch ganz allgemein eine Korrektion. Diese wurde nach einer von Herrn Professor F. A. Schulze[1]) aus der van d. Waalsschen Zustandsgleichung berechneten Korrektionsformel angebracht, wonach

$$\varkappa = \varkappa_1 \left(1 - \frac{\pi \cdot \tau}{4} + \frac{27}{32} \pi \tau^2\right)$$

[1]) s. eine demnächst in den „Ann. d. Physik“ erscheinende Abhandlung.

ist. Der Klammerausdruck stellt die Konstante C_1 dar, $\varkappa_1$ ist der unkorrigierte $\varkappa$-Wert.

$$\pi = \frac{p_{\text{Versuch}}}{p_{\text{Krit.}}} \qquad \tau = \frac{\Theta_{\text{Krit.}}}{\Theta_{\text{Versuch}}},$$

wobei

$$p_{\text{Versuch}} = 0{,}8 \text{ Atm.}, \quad \Theta_{\text{Versuch}} = 291{,}3^0$$
$$p_{\text{Krit.}} = 52{,}9 \text{ Atm.}, \quad \Theta_{\text{Krit.}} = 755{,}6^0.$$

Die Konstante C_1 findet sich zu $C_1 = 1{,}0016212$.

Die Konstante C_2 stellt die Korrektionskonstante der Kirchhoffschen Korrektion dar. Die Schallgeschwindigkeit in einer Röhre ist gegenüber der in freier Luft um so kleiner, je enger die Röhre und je tiefer der Ton ist. Die Abnahme der Schallgeschwindigkeit hängt ab von der Dichte, dem Reibungskoeffizienten, dem Wärmeleitvermögen des Gases sowie dem Radius der Röhre, außerdem bei Anwendung der Staubfigurenmethode noch von den Störungen, die durch das Pulver bedingt werden. Mit der Untersuchung des Einflusses dieser Faktoren hatte sich zuerst H. v. Helmholtz,[1] [2]) dann Kundt,[3]) Kirchhoff,[4]) J. Müller,[5]) F. A. Schulze[6]) beschäftigt. Nach Kirchhoff ist

$$v = \frac{V}{1 + \frac{\gamma}{2R \cdot \sqrt{\pi \cdot n}}}, \tag{8}$$

wobei

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{\varrho}} \left| \sqrt{\eta} + \left(\sqrt{\varkappa} - \sqrt{\frac{1}{\varkappa}} \right) \sqrt{\frac{\varepsilon}{c_v}} \right|^{7}) \tag{9}$$

ist. Es bedeuten hierbei:

---

[1]) H. v. Helmholtz, Verh. d. naturhist.-medizin. Vereins in Heidelberg 1863 Bd. 1 S. 16.

[2]) H. v. Helmholtz, Wissenschaftl. Abhandlgn. 1882 Bd. 1 S. 383.

[3]) A. Kundt, Monatsber. d. Berl. Akad. v. 19. 12. 1867.

[4]) G. Kirchhoff, Pogg. Ann. 1868 Bd. 134 S. 177.

[5]) J. Müller, Ann. d. Phys. 1903 Bd. 11 S. 331.

[6]) F. A. Schulze, Ann. d. Phys. 1904 Bd. 13 S. 1060.

[7]) s. auch P. Valentiner, Ann. d. Phys. IV, 15 S. 93.

v die Schallgeschwindigkeit im Rohr;

V die Schallgeschwindigkeit in freier Luft;

ϱ_0 die Gasdichte $\left\{\begin{matrix}0{,}001\,292\,8 \text{ für Luft} \\ 0{,}001\,782\,9 \text{ für Argon}\end{matrix}\right\}$ nach Kohlrausch;

η den Reibungskoeffizienten

$= 0{,}000\,1911$ für Luft bei $t = 18^\circ$ nach G. Zemplin, Ann. d. Phys. 1909 Bd. 29 (4) S. 869—908,

$= 0{,}000\,2204$ für Argon bei $t = 16^\circ$ nach Rankine, Physikal. Zeitschr. 1910 Bd. 11;

$\varkappa = \frac{c_p}{c_v} = 1{,}402\,3$ für Luft

$= 1{,}667$ für Argon nach Niemeyer, Diss. Halle 1902;

ε den Wärmeleitungskoeffizienten

$= 0{,}000\,056\,90$ für Luft bei 0° nach W. Schwarze, Ann. d. Phys. 1903 Bd. 11 S. 303, 1144,

$= 0{,}000\,038\,94$ für Argon bei 0° nach W. Schwarze, Phys. Zeitschr. 1903 Bd. 4 S. 229;

$c_p = 0{,}2376$ für Luft nach Escher, Diss. Marburg 1912;

$c_p = 0{,}1233$ für Argon nach W. Dittenberger, Diss. Halle 1897;

R den Radius der Röhren $= 1{,}15$ cm;

n die Schwingungszahl des Tones $= 3313$.

Die Formeln (8) und (9) ergeben bei Einsetzung obiger Werte für das Verhältnis $\frac{\lambda_{\text{Argon}}}{\lambda_{\text{Luft}}}$ den Korrektionsfaktor $C_2 = 1{,}000\,31$. Die Gaskonstante R wurde nach der Beziehung

$$R_{\text{Argon}} = \frac{3710{,}4}{\varrho_{\text{Argon}}}$$ [1])

berechnet, wobei

$$\varrho_{\text{Argon}} = 0{,}0017829$$

war. Die Schallgeschwindigkeit im Argon ergibt sich aus der Gleichung (3)

$$V = \sqrt{\varkappa \cdot R_{\text{Argon}} \cdot \Theta}$$ zu $\underline{V = 318{,}04 \text{ m/sec}}$ bei $18{,}3^\circ$ C.

[1]) F. Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Phys. 1914 S. 676.

Tabelle 2.

Nr.	Dauer Min.	λ_1 mm	λ_2 mm	t_1	t_2	$t_2 - t_1$	$\varkappa_1$	$\varkappa_2$	Differenz
1	34	46,10	46,69	18,13	26,41	8,28	1,6685	1,664 37	— 0,004 13
2	35	46,15	46,78	18,60	27,20	8,60	„	1,668 67	+ 0,000 17
3	30	46,20	46,83	18,40	26,40	8,00	„	1,668 37	— 0,000 13
4	32	46,10	46,77	18,30	26,90	8,60	„	1,668 47	— 0,000 03
5	30	46,30	46,97	18,80	27,00	8,20	„	1,670 27	+ 0,001 77
6	32	46,20	46,84	18,50	26,60	8,10	„	1,669 07	+ 0,000 57

b) Ionisationsversuche.

Die Tabelle 2 läßt in der letzten Spalte erkennen, ob ein Einfluß der Ionisation vorhanden ist. Berechnet wurde folgendermaßen:

In Formel (7) S. 7:

$$\varkappa_2 = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2} \frac{\Theta_1}{\Theta_2} \varkappa_1$$

sollen die mit dem Index 1 versehenen Größen für unbestrahlten Zustand, die mit dem Index 2 versehenen für bestrahlten Zustand gelten; für $\varkappa_1$ wurde der von mir ermittelte Wert = 1,6685 eingesetzt. Die Tabelle gibt die bezüglich der Temperatur umgerechneten Werte für die einzelnen Versuche und die Differenzen gegen den Normalwert. Die Änderungen bleiben sämtlich innerhalb der Fehlergrenze, zumal es bei der Messung von nur zwei Halbwellenlängen nicht möglich ist, mit höherer Genauigkeit als etwa $^1/_2\,\%$ abzulesen.

VI. Betrachtungen über das Ergebnis.

a) Absolute Bestimmung.

Niemeyer[1]) hatte für 0 und 13° den Wert 1,667, bei 100° 1,668 gefunden. Der von mir bei 18,3° ermittelte Wert

$$\varkappa = 1{,}6685$$

[1]) O. Niemeyer, Diss. Halle 1902; s. auch Landolt-Börnstein, Tabellen 1912 S. 775.

befindet sich mit den vorgenannten Werten in befriedigender Übereinstimmung. Bei dem von mir[1]) bereits veröffentlichten auf 1,669 abgerundeten Wert waren die beiden hier angeführten Korrektionen bereits berücksichtigt.

b) Das negative Ergebnis der Ionisationsversuche.

Nach den in der Tabelle 2 gegebenen Werten kann von einer Änderung von $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ infolge Ionisation nicht gesprochen werden. Welche Bedeutung diesem negativen Resultat zukommt, wird erkennbar, wenn man die Ansichten über die Einwirkung der Ionisation auf die Größe $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ ins Auge faßt, wie sie Herr Prof. Richarz in seinem Vortrage v. 7. 5. 1913[2]) ausgesprochen hat. Sieht man mit Prof. Richarz die Ursache der $\varkappa$-Erhöhung möglicherweise darin, daß die durch Ionisation dissoziierten Molekeln mehratomiger Gase sowie die der Dissoziation nahen derselben die Erhöhung des $\varkappa$-Wertes, also eine Annäherung an den einatomigen Zustand herbeiführen, so gewinnt diese Vermutung wesentlich an Wahrscheinlichkeit, wenn man sich vor Augen hält, daß bei einem einatomigen, nicht durch Ionisation dissoziierbaren Gase keine Erhöhung eintritt. Inzwischen hat Herr W. H. Westphal[3]) die Versuche von W. Küpper[4]) mit einer genau gleichen Apparatur für Luft wiederholt, jedoch keine Änderung der Schallgeschwindigkeit bei starker Röntgenbestrahlung feststellen können. Herr Westphal weist auf die bereits von Herrn Prof. Richarz[5]) gemachte Bemerkung über die Größe der Schallgeschwindigkeitsänderung gegenüber der geringen Zahl der nach W. Küpper sie veranlassenden Ionen hin und macht auf einige Mängel der Apparatur von Küpper aufmerksam. Ferner hat W. Küpper selbst

[1]) F. Strieder, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. Bd. 16 Nr. 13 1914 S. 615 u. 616.

[2]) Sitzungsber. d. Ges. z. Bef. d. ges. Naturwiss., Marburg 1913, S. 5.

[3]) W. H. Westphal, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. Bd. 16 Nr. 13 1914 S. 613 u. 614.

[4]) W. Küpper a. a. O.

[5]) F. Richarz a. a. O.

einige Versehen in seiner Arbeit berichtigt.[1]) Deshalb sollen auf Anregung von Herrn Prof. Richarz mit der von mir benutzten Apparatur, welche die nachteiligen Eigenschaften der Küpperschen nicht aufweist, zur endgültigen Klärung der Sachlage auch mehratomige Gase im hiesigen Institut untersucht werden. Diese Arbeiten sind von Herrn W. Zeh bereits vor einiger Zeit in Angriff genommen worden, werden allerdings, da der Genannte am Kriege teilnimmt, erst in unbestimmter Zeit zu Ende geführt werden können.

[1]) W. Küpper, Ann. d. Phys. IV 1914 Bd. 45 S. 176.

Robert Noske, Borna-Leipzig, Großbetrieb für Dissertationsdruck.

Es sei mir gestattet, auch an dieser Stelle meinem hochverehrten Lehrer,

Herrn Professor Dr. F. Richarz,

für die Anregung zu dieser Untersuchung und das mir in reichem Maße entgegengebrachte Wohlwollen meinen verbindlichsten Dank abzustatten.

In gleicher Weise danke ich herzlichst

Herrn Professor Dr. F. A. Schulze

für die dauernde liebenswürdige Unterstützung bei der Ausführung dieser Arbeit.

Herrn Dr. K. Stuchtey bin ich für freundliche Ratschläge ebenfalls zu vielem Dank verpflichtet.

Lebenslauf.

Ich, Franz Johannes Rudolf Strieder, bin geboren am 17. November 1878 zu Wiesbaden als Sohn des Eisenbahnobersekretärs Franz Strieder und seiner Gattin Christine geb. Fiedler. Ich bin preußischer Staatsangehöriger und römisch-katholischen Bekenntnisses. Nach dreijährigem Besuch der Ostend-Mittelschule zu Frankfurt a. M. trat ich Ostern 1888 in das Kaiser-Friedrichs-Gymnasium daselbst ein, welches ich Ostern 1897 mit dem Reifezeugnis verließ. Ich studierte alsdann an der Universität München Mathematik und Naturwissenschaften (SS. 1897 bis SS. 1898), alsdann an der Technischen Hochschule zu Darmstadt Elektrotechnik (WS. 1898/99 und SS. 1899), hierauf an der Technischen Hochschule zu Berlin Maschinenbau, bestand 1901 die Diplomvorprüfung und verblieb dort Spezialstudien halber bis SS. 1907. In den Jahren 1908/09 war ich als Maschineningenieur tätig. Ostern 1911 bezog ich die Universität Marburg, begann Ostern 1913 vorliegende Arbeit im Physikalischen Institut und bestand am 19. November 1914 das Rigorosum. Seitdem bin ich als Assistent am genannten Institut tätig.

Meine akademischen Lehrer, denen ich zu vielem Dank verpflichtet bin, waren:

in München: v. Hertling, Koenigs, Korn, v. Lommel, Maas, v. Weber;

in Darmstadt: Berndt, Henneberg, Lincke, Kittler, Krauß, Marx, Staedel, Wiener, Wirtz;

in Berlin: Hartmann, Hörmann, Kammerer, Koch, Lampe, Laske, Leist, Ludewig, Müller-Breslau, Reichel, Riedler, Roeßler, Stumpf, Wedding;

in Marburg: Bornhausen, Cohen, Diels, Feußner, Hellinger, Hensel, Jensen, Korschelt, Müller, Natorp, Neumann, Richarz, Schücking, Schulze, Tuczek.